

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНОГО ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

А. И. Пашкин

<sup>1</sup> Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»  
Горный институт, Москва, Россия

**Аннотация:** Проведен краткий обзор современных методов неразрушающего контроля. Проанализированы их преимущества и недостатки в исследовании крупногабаритных гетерогенных объектов. Установлено, что наиболее информативными при диагностике структуры и свойств таких сложных гетерогенных материалов, как горные породы, являются акустические методы. Рассмотрены современные методы генерации ультразвука и их влияние на характеристики зондирующего сигнала. Подтверждено, что методы лазерной генерации позволяют наилучший контроль над характеристиками зондирующего сигнала. Также проведен анализ средств цифровой обработки, используемых в совокупности с акустическими методами. Обоснована необходимость оценки влияния характеристик оптико-акустических преобразователей на зондирующий сигнал. Предложено использование «Программы для моделирования распространения гауссовых пучков методом ABCD-матриц» для создания модели и оценки влияния упомянутых выше характеристик. Проведена оценка влияния длительности лазерного импульса, свойств светопоглощения и акустических характеристик генераторной среды на амплитуду и ширину полосы спектра зондирующего сигнала. Обнаружена возможность контроля некоторых характеристик оптико-акустического преобразователя с целью настройки под нужды конкретных исследований. Предложены направления дальнейших исследований с целью упрощения контроля характеристик зондирующего сигнала посредством изменения характеристик оптико-акустического преобразователя.

**Ключевые слова:** гетерогенные материалы, лазерный ультразвук, оптико-акустические преобразователи, зондирующий сигнал, моделирование, гетерогенные среды, метод ABCD-матриц, цифровая обработка.

**Благодарность:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90044.

**Для цитирования:** Пашкин А. И. Определение оптимальных характеристик низкочастотного оптико-акустического преобразователя для диагностики геоматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4-1. – С. 62–72. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_62.

## The low-frequency optoacoustic transducer optimal characteristics determination for diagnostics of geomaterials

A. I. Pashkin

<sup>1</sup> National Research Technological University «MISiS», Moscow, Russia

**Abstract:** The paper presents an overview of modern non-destructive testing methods, analyzing their advantages and disadvantages from the perspective of studying large-size heterogeneous objects. It is found that acoustic methods are the most informative when it comes to studying the structure and properties of such complex heterogeneous materials as rocks. The paper analyzes modern methods of generation of ultrasound, addressing characteristics of the sounding signal. It is confirmed that the laser generation of ultrasound is the best way to control the characteristics of the sounding signal. The paper also analyzes digital processing tools used in combination with acoustic methods. It is substantiated that the relationship between the characteristics of optoacoustic transducers and those of the sounding signal should be necessarily estimated. It is proposed that the Program for Modeling the Propagation of Gaussian Beams by the ABCD-matrix Method should be used to create a model assessing the relationship between the above characteristics. It is analyzed how the spectrum of the sounding signal changes depending on the laser pulse duration and light absorption and acoustic characteristics of the generator. It is found that certain characteristics of an optoacoustic transducer can be controlled so as to tune the transducer to be suitable for purposes of some research. Directions for further research are proposed with a view to controlling the characteristics of the sounding signal by tuning the characteristics of the optoacoustic transducer.

**Key words:** heterogeneous materials, laser ultrasound, optical-acoustic converters, probing signal, modeling, heterogeneous media, ABCD-matrix method, digital processing.

**Acknowledgment:** The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of scientific project No. 20-35-90044.

**For citation:** Pashkin A. I. The low-frequency optoacoustic transducer optimal characteristics determination for diagnostics of geomaterials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(4-1):62–72. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_41\_0\_62.

---

## Введение

Мониторинг и обнаружение неоднородностей как в горных породах, так и в других средах и изделиях, определение структурной прочности крепи — все эти задачи являются неотъемлемой частью современных горных работ. При этом основное требование, предъявляемое к системам контроля, заключается в необходимости проведения диагностики структуры и состояния крупногабаритных объектов из гетерогенных материалов. Наиболее часто используемыми методами для данных целей являются георадиолокационные исследования [1–3], термография [4–7] и низкочастотные акустические методы [8–10].

Как отмечалось в обзоре [1], отражающем 30-летнюю историю использования георадаров, в задачах неразрушающего контроля данный метод практикуется для диагностики состояния зданий, дорог, мостов, туннелей, инженерно-геологических и подземных

коммуникаций. Георадиолокация дает возможность качественно оценивать структуру объектов из гетерогенных материалов и ее изменение. Однако информация, получаемая из треков отраженных на неоднородностях электромагнитных импульсов, не является достаточной для идентификации и локализации дефектов [2, 3].

Тепловизионный контроль, основанный на регистрации изменения теплового потока, позволяет определять места нарушений сплошности в объектах [4] и лишь качественно оценивать их геометрические параметры. Поэтому с помощью данного метода в основном изучаются теплозащитные конструкции [4] и различные виды композитов [5–7].

Наиболее информативными при диагностике структуры и свойств таких сложных гетерогенных материалов, как горные породы, являются акустические методы [8–10]. К ним относятся акустическая эмиссия [8], виброме-

трия [9, 10] и ультразвуковые методы, использующие пьезопреобразователи и антенные решетки из пьезоэлементов [11], а также лазерно-ультразвуковые методы [12–14]. В любом из перечисленных выше методов возникает задача цифровой обработки принимаемых рассеянных или отраженных от неоднородностей сигналов и идентификация по ним неоднородностей структуры.

Для цифровой обработки с целью идентификации неоднородностей структуры предложено большое количество методов для различных условий исследований [15–19]. Также стоит отметить, что для решения задач обратного преобразования при моделировании, необходимом для определения характера и местоположения неоднородностей, требуются новые высокопроизводительные программные решения для построения соответствующих моделей [20–24]. Среди методов моделирования самым распространенным является метод конечных элементов (МКЭ), а также его различные вариации [25–29].

Основным преимуществом МКЭ является использование его при моделировании любых сложных объектов при высокой точности расчета. Однако незначительное увеличение точности приводит к существенному увеличению времени обработки модели, а незначительное усложнение самой модели резко снижает скорость расчета [25–27]. Поэтому несмотря на универсальность метода МКЭ многие работы посвящены его модификации. Так, в работе [28] был предложен метод, в котором использовался МКЭ с масштабируемыми границами. Метод позволял ускорить расчеты в случае высокочастотных сигналов, а авторы [29] предложили использовать при моделировании расширенный МКЭ, называемый также XFEM.

Результаты исследований при использовании любых ультразвуковых методов сильно зависят от характеристик генератора и приемника ультразвуковых сигналов. Стоит отметить, что по этому критерию наиболее точным и контролируемым методом генерации ультразвука на сегодняшний день является лазерная генерация, поскольку в традиционных пьезопреобразователях невозможно реализовать эффективное возбуждение и прием широкополосных ультразвуковых сигналов [30], [31]. Но и в случае лазерной генерации влияние оптико-акустического преобразования на форму и спектр зондирующего сигнала исследовано не полностью. Для регистрации рассеянных и отраженных сигналов при данном способе возбуждения используются широкополосные пьезоприемники, в которых для повышения качества преобразования механических сигналов в электрические применяются различные методы [32–35].

Таким образом, определение характеристик оптико-акустического преобразователя, оказывающих основное влияние на зондирующий сигнал, и нахождение их оптимальной для проведения диагностики геоматериалов комбинации остается актуальной задачей.

### **Структура и принцип работы оптико-акустического преобразователя**

В лазерно-ультразвуковой (ЛУ) диагностике оптический импульс поглощается в плоскопараллельной пластиковой пластинке — оптоакустическом генераторе (ОАГ) (рис. 1). Один из данных сигналов распространяется в акустически прозрачную призму (рис. 1), совмещенную с широкополосным пьезоприемником и служит опорным сигналом, второй, зондирующий, распространяется через генератор (рис. 1)

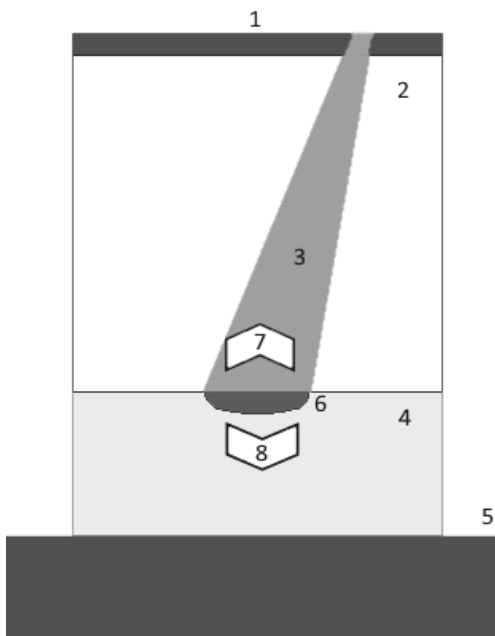


Рис. 1. Схема строения оптико-акустического датчика: 1 – пьезоприемник; 2 – акустически прозрачная призма; 3 – оптический луч; 4 – оптико-акустический генератор, 5 – исследуемая среда, 6 – зона тепловых процессов, 7 – опорный сигнал, 8 – зондирующий сигнал

Fig. 1. Diagram of the structure of the optical-acoustic sensor: 1 – piezo receiver, 2 – acoustically transparent prism, 3 – optical beam, 4 – optical-acoustic generator, 5 – medium under study, 6 – zone of thermal processes, 7 – reference signal, 8 – probing signal

в исследуемую среду. Возникает две границы раздела: генератор – призма и генератор – исследуемая среда. На каждой границе возникают отраженные и прошедшие волны. Как было показано в работе [36], процесс распространения данных волн можно описать с помощью ABCD-матриц, используемых в оптике. При этом для корректного описания структурных особенностей образцов горных пород с использованием зондирующих импульсов необходимо знать их спек-

тральные характеристики с учетом всех границ и переотражений.

### Определение оптимальных параметров генерации

Спектр генерируемого зондирующего импульса можно описать формулой [35]:

$$P(\omega) = \left( \frac{P_0}{\alpha c} \right) \frac{\left( \frac{1}{N+1} \right) \left( 1 + iN \frac{\omega}{\alpha c} \right)}{1 + \left( \frac{\omega}{\alpha c} \right)^2} e^{-\left( \frac{\omega \tau_l}{2} \right)^2}, \quad (1)$$

где  $P_0$  – амплитудный коэффициент, определяемый мощностью лазерного излучения;  $\alpha$  – показатель поглощения света среды генератора (1/м);  $c$  – скорость звука в среде генератора (м/с);  $N$  – отношение акустических импедансов нагружающей призмы и среды генератора;  $\tau_l$  – длительность лазерного излучения (с).

Таким образом, начальные характеристики зондирующего импульса определяются мощностью и длительностью лазерного излучения, а также показателем поглощения света генераторной среды. Помимо этих параметров на форму и спектр сигнала также влияют акустическое затухание и дисперсия фазовой скорости, причем влияние данных явлений внутри оптико-акустического преобразователя не несет никакой полезной информации, в отличие от перечисленных выше характеристик в пределах исследуемого образца, и лишь осложняет процесс диагностики. Следовательно такие характеристики, как плотность, скорость распространения звука, коэффициент затухания и протяженность внутренних элементов датчика также оказывают сильное влияние на зондирующий сигнал и идентификацию дефектов.

Для определения степени влияния характеристик оптико-акустического

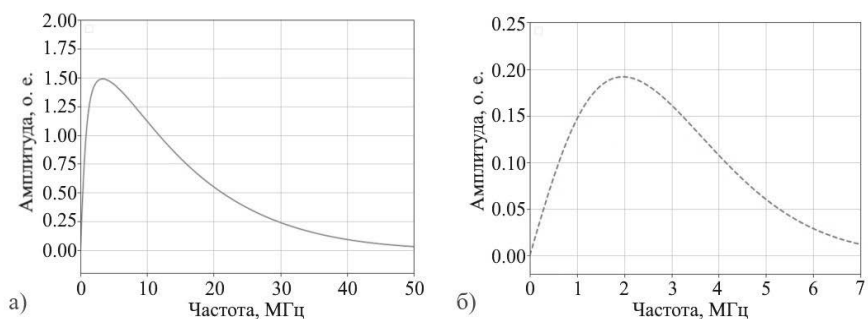


Рис. 2. Спектр зондирующего сигнала при  $\tau_l = 10$  нс: а – сразу после генерации; б – после прохождения модели

Fig. 2. The spectrum of the probing signal at  $\tau_l = 10$  ns: а – immediately after generation; б – after passing the model

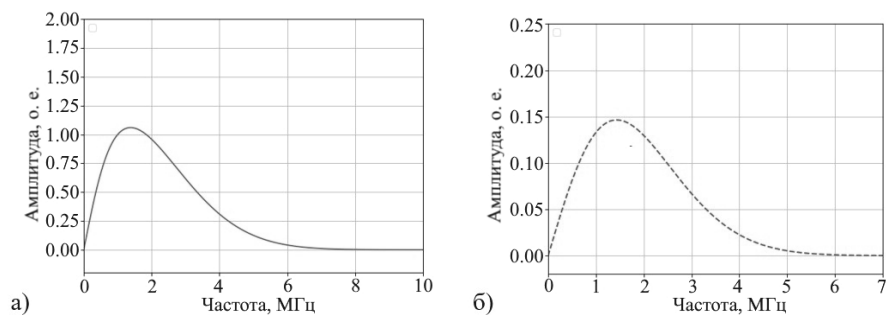


Рис. 3. Спектр зондирующего сигнала при  $\tau_l = 100$  нс: а – сразу после генерации; б – после прохождения модели

Fig. 3. The spectrum of the probing signal at  $\tau_l = 100$  ns: а – immediately after generation; б – after passing the model

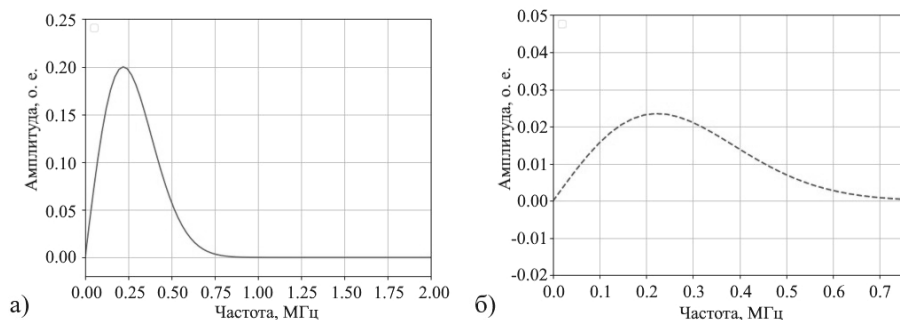


Рис. 4. Спектр зондирующего сигнала при  $\tau_l = 1$  мкс: а – сразу после генерации; б – после прохождения модели

Figure 4. Spectrum of the probing signal at  $\tau_l = 1$   $\mu$ s: а – immediately after generation; б – after passing the model

преобразователя на спектр зондирующего сигнала использовалась числен-

ная модель, составленная при помощи «Программы для моделирования рас-

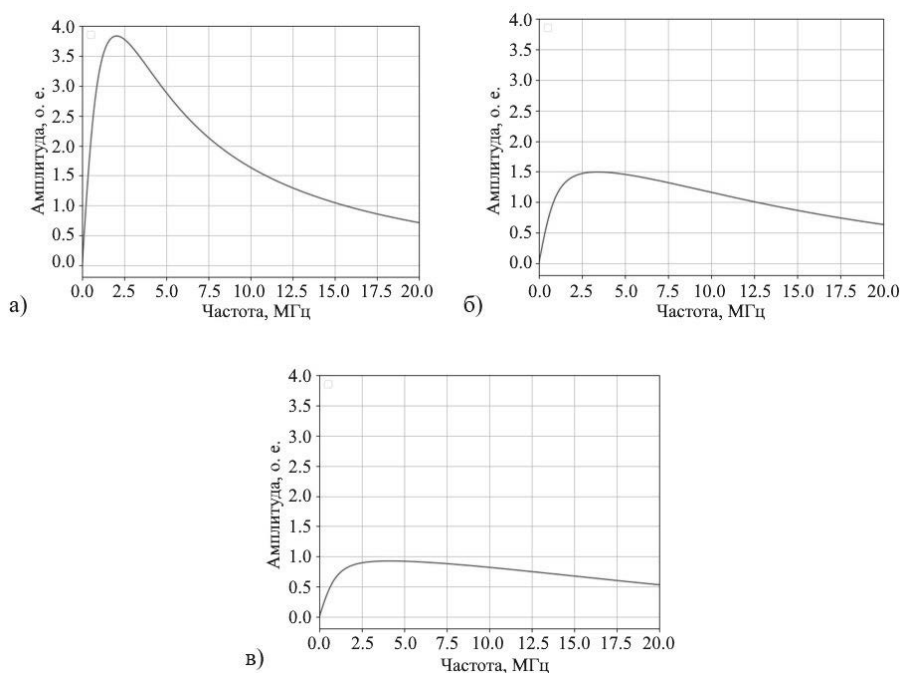


Рис. 5. Спектр зондирующего сигнала при различных показателях поглощения  $\alpha$ :  
 а – 10 000, 1/м; б – 30 000, 1/м; в – 50 000, 1/м

Fig. 5. The spectrum of the probing signal at different absorption rates  $\alpha$ :  
 а – 10 000, 1/m; б – 30 000, 1/m; в – 50 000, 1/m

пространения гауссовых пучков методом ABCD-матриц» [37]. Модель включает в себя датчик, прижатый к стальной пластине, толщина 1 см. Плотность стали принималась равной 7700,0 кг/м<sup>3</sup>, скорость распространения звука 5740,0 м/с.

С целью оценки влияния длительности лазерного излучения на зондирующий сигнал проведено моделирование для трех разных значений: 10 нс, 100 нс и 1 мкс. На рис. 2–4 приведены спектры зондирующего сигнала при этих значениях. На рисунках под буквой «а» — спектр сигнала сразу после генерации, под буквой «б» — после прохождения через преобразователь, сантиметровую стальную пластину и обратно к приемнику.

Из рис. 2–4 видно, что уменьшение длительности лазерного импульса приводит к заметному расширению

начального спектра сигнала, в то время как увеличение — к сужению. Таким образом, изменение длительности лазерного импульса позволяет управлять шириной спектра зондирующего сигнала.

Для оценки влияния показателя поглощения света генераторной пластины также проведено моделирование для трех различных значений. На рис. 5 изображены спектры сигналов при разных показателях поглощения света. Как видно из рисунка, при уменьшении значения показателя поглощения заметно растет амплитуда сигнала, что в свою очередь упрощает диагностику, позволяя наблюдать отклик при меньшей мощности лазерного излучения. Также стоит отметить возможность подбора материала генераторной пластины для конкретной диагностической задачи.

## Заключение

На основе полученных данных выявлено, что свойства пьезопреобразователя и условия лазерной генерации могут быть использованы для контроля характеристик зондирующего сигнала. Так, изменение длительности лазерного импульса позволяет управлять шириной спектра зондирующего сигнала. В то же время, показатель поглощения света генераторной среды позволяет изменять амплитуду зон-

дирующего сигнала без изменения мощности лазерного излучения, что дает возможность подбора материала датчика для конкретных исследований. Но для упрощения подбора оптимального материала генераторной среды требуется проведение дальнейших исследований, в частности, экспериментов на различных материалах с целью определения их показателей поглощения света и акустического затухания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wallace Wai-Lok Lai, Xavier Dérobert, Peter Annan* A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis // *NDT & E International*, 2018, Vol. 96, pp. 58 – 78.
2. *Jun Zhang, Chao Zhang, Yaming Lu, Ting Zheng, Yunyi Jia* In-situ recognition of moisture damage in bridge deck asphalt pavement with time-frequency features of GPR signal // *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 24430, a. 118295.
3. *Agred K., Klysz G., Balayssac J. -P.*, Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna // *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 18810, pp. 1119 – 1127.
4. *Вавилов В. П.* Тепловидение и тепловой контроль для инженеров – М.: Спектр, – 2017. – 72 с.
5. *Чулков А. О., Вавилов В. П., Московченко А. И.* Активный тепловой контроль отслоений в теплозащитных конструкциях. // *Дефектоскопия*, – 2019, – № 3, – с. 58 – 65.
6. *Vavilov V. P., Karabutov A. A., Chulkov A. O., Cherepetskaya E. B., Mironova E. A.*, Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts // *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 2020, 17(4), p.p. 235–248, DOI: 10.1080/17686733.2019.1646971.
7. *Chaki S., Harizi W., Bourse G., Ourak M.* Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, Vol. 78, pp. 358 – 361.
8. *Tschegg E. K., Schneemayer A., Merta I., Rieder K. A.* Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension compression load. Part II: Determination of the fracture process zone with the acoustic emission technique // *Cement and Concrete Composites*, 2015, Vol. 62, pp. 187 – 194.
9. *Ahn S., Jeon E. B., Koh H., Kim S., Park J.* Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements // *Composite Structures*, 2016, Vol. 136, pp. 11 – 15.
10. *Chen J. G., Haupt R. W., Buyukozturk O.* Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete. // *NDT & E International*, 2015, Vol. 71, pp. 43 – 53.
11. *Castellano A., Fraddosio A., Piccioni M. D.* Ultrasonic goniometric immersion tests for the characterization of fatigue post-LVI damage induced anisotropy superimposed to the constitutive anisotropy of polymer composites. // *Composites Part B: Engineering*, 2017, Vol. 116, pp. 122 – 136.

12. *Zarubin V., Bychkov A., Simonova V., Zhigarkov V., Karabutov, A., Cherepetskaya E.* A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile // *Applied Physics Letters*, 2018, Vol. 112, № 214102,. DOI: 10.1063/1.5030586.

13. *Bychkov A. S., Cherepetskaya E. B., Karabutov A. A., Makarov V. A.,* Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air // *Laser Physics Letters*, 2016, Vol. 13, i. 8, № 085401.

14. *Grigoriev, K. S., Kuznetsov, N.Yu., Cherepetskaya, E. B., Makarov, V. A.* Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response by heterogeneously polarized pulsed beams // *Optics Express*, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253 – 6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253.

15. *Липовко П. О., Логанчук М. Л.* Компонентный анализ бинарных сред методом акустической рефлектоимпедансометрии // *Компьютерные исследования и моделирование*, 2015. — Т. 7. — № 2. — С. 301 – 313.

16. *Shastin V. I., Kargapoltocev S. K., Gozbenko V. E., Livshits A. V. and Filippenko N. G.,* Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods, *Inter-national Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, 2017, pp. 15269 – 15272.

17. *Жижимонтов И. Н., Степанов С. В., Свалов А. В.* «Применение стохастического порового-сетевого моделирования для получения уточненной зависимости пористость – абсолютная проницаемость на примере неокомских отложений месторождения Западной Сибири» // *Нефтяное хозяйство*, 2017. — С. 96 – 98.

18. *Bilal Saad, Ardi Negara, Syed Shujath Ali* Digital Rock Physics Combined with Machine Learning for Rock Mechanical Properties Characterization // *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2018, doi: 10.2118/193269-MS.

19. *Дучков А. Д., Дугаров Г. А., Дучков А. А., Дробчик А. Н.* Лабораторные исследования скорости и поглощения ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду/лед, гидраты метана и тетрагидрофурана // *Геология и геофизика*. — 2019. — №2. doi: 10.15372/GiG2019015.

20. *Mottershead J. E., Friswell M. I.,* Model updating in structural dynamics: a survey // *J. Sound Vib.*, 1993, Vol. 167, pp. 347–375.

21. *Friswell M. I., Mottershead J. E.* Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1995, 286 p.

22. *Zou Y., Tong L., Steven G. P.* Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures-a review // *J. Sound Vib.*, 2000, Vol. 230, pp. 357–378.

23. *Sinha J. K., Friswell M. I., Edqards S.* Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data // *J. Sound Vib.*, 2002, Vol. 251, pp. 13–38

24. *Liu G. R., Han X.* Computational Inverse Techniques in Nondestructive Evaluation // CRC Press, Boca Raton, FL., 2003., 592 p.

25. *Taheri H., Koester L. W., Bigelow T. A., Bond L. J.* Thermoelastic finite element modeling of laser generated ultrasound in additive manufacturing materials. // *ASNT Annual Conference 2017*, 2017, pp. 188–198.

26. *Фаворская А. В.* Исследование свойств материала пластины лазерным ультразвуком при помощи анализа кратных волн // *Компьютерные исследования и моделирование*, 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 653 – 673.

27. *Sun H., Waisman H., Betti R.* A sweeping window method for detection of flaws using an explicit dynamic XFEM and absorbing boundary layers // *Internat. J. Numer. Methods Engrg.*, 2016, Vol. 105, pp. 1014–1040.

28. *Gravenkamp H., Natarajan S., Dornisch W.* On the use of NURBS-based discretizations in the scaled boundary finite element method for wave propagation problems // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2017, Vol. 315, pp. 867–880.



29. Jung J., Jeong C., Taciroglu E. Identification of a scatterer embedded in elastic heterogeneous media using dynamic XFEM // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2013, Vol. 259, pp. 50–63.

30. Bychkov A., Simonova V., Zarubin V., Cherepetskaya E., Karabutov A., The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry: A review, Vol. 8, (10), 2018, DOI: 10.3390/app8101931.

31. Potravkin N. N., Cherepetskaya E. B., Perezhogin I. A., Makarov V. A., Ultrashort elliptically polarized laser pulse interaction with helical photonic metamaterial // *Optical Materials Express*, Vol. 4, (10), 2014, p.p. 2090 – 2101, DOI: 10.1364/OME.4.002090.

32. Kim J. E., Kim D. S., Ma P. S., Kim Y. Y., Multi-physics interpolation for the topology optimization of piezoelectric systems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, Vol. 199, pp. 3153–3168.

33. Zhai J., Zhao G., Shang L., Integrated design optimization of structural size and control system of piezoelectric curved shells with respect to sound radiation // *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, Vol. 6.

34. Zhai S., Chen H., Ding C., Shen F., Luo C., Zhao X., Manipulation of transmitted wave front using ultrathin planar acoustic metasurfaces // *Applied Physics A*, 2015, Vol. 120(4), pp. 1283–1289.

35. Gil Ho Y., Hyunggyu C., Shin H., Multiphysics topology optimization for piezoelectric acoustic focuser // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, Vol. 332, pp. 600–623.

36. Пашкин А. И., Винников В. А., Моделирование Распространения Лазерноультразвукового Зондирующего Импульса В Слоистой Среде Методом ABCD-Матриц // *Горный Информационно-Аналитический Бюллетень*. – 2020. – №6. – С. 140–150.

37. Программа для моделирования генерации и распространения оптико-акустических сигналов в слоистых средах методом ABCD-матриц; Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU №2020610531/ Пашкин А. И. (RU); заявитель ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»; заявл. 11.12.2019 №2019666270 (Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ от 15.01.2020. **ФИАС**)

## REFERENCES

1. Wallace Wai-Lok Lai, Xavier Dérobert, Peter Annan, A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. *NDT & E International*, 2018, Vol. 96, pp. 58 – 78.

2. Jun Zhang, Chao Zhang, Yaming Lu, Ting Zheng, Yunyi Jia, In-situ recognition of moisture damage in bridge deck asphalt pavement with time-frequency features of GPR signal. *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 24430, a. 118295

3. Agred K. Klysz G. Balayssac J.-P. Location of reinforcement and moisture assessment in reinforced concrete with a double receiver GPR antenna. *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 18810, pp. 1119 – 1127

4. Vavilov V. P. Thermal imaging and thermal control for engineers. Moscow, *Spektr* publ. 2017, pp. 72. [In Russ]

5. Chulkov A. O. Vavilov V. P. Moskvichenko A. I. Active thermal control of delamination in thermal protection structures. *Defektoskopiya*, 2019, Vol. 3, p.p. 58 – 65 [In Russ]

6. Vavilov V. P. Karabutov A. A. Chulkov A. O. Cherepetskaya E. B. Mironova E. A. Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2020, 17(4), p.p. 235–248, DOI: 10.1080/17686733.2019.1646971

7. Chaki S. Harizi W. Bourse G. Ourak M. Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, Vol. 78, pp. 358 – 361

8. Tschegg E. K. Schneemayer A. Merta I. Rieder K. A. Energy dissipation capacity of fibre reinforced concrete under biaxial tension compression load. Part II: Determination of the fracture process zone with the acoustic emission technique. *Cement and Concrete Composites*, 2015, Vol. 62, pp. 187–194
9. Ahn S. Jeon E. B. Koh H. Kim S. Park J. Identification of stiffness distribution of fatigue loaded polymer concrete through vibration measurements. *Composite Structures*, 2016, Vol. 136, pp. 11–15
10. Chen J. G. Haupt R. W. Buyukozturk O. Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete. *NDT & E International*, 2015, Vol. 71, pp. 43–53
11. Castellano A. Fraddosio A. Piccioni M. D. Ultrasonic goniometric immersion tests for the characterization of fatigue post-LVI damage induced anisotropy superimposed to the constitutive anisotropy of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 2017, Vol. 116, pp. 122–136
12. Zarubin V. Bychkov A. Simonova V. Zhigarkov V. Karabutov, A. Cherepetskaya E. A refraction-corrected tomographic algorithm for immersion laser-ultrasonic imaging of solids with piecewise linear surface profile. *Applied Physics Letters*, 2018, Vol. 112, no. 214102, DOI: 10.1063/1.5030586.
13. Bychkov A. S. Cherepetskaya E. B. Karabutov A. A. Makarov V. A. Laser optoacoustic tomography for the study of femtosecond laser filaments in air. *Laser Physics Letters*, 2016, Vol. 13, i. 8, no. 085401
14. Grigoriev, K. S. Kuznetsov, N.Yu. Cherepetskaya, E. B. Makarov, V. A. Second harmonic generation in isotropic chiral medium with nonlocality of nonlinear optical response by heterogeneously polarized pulsed beams. *Optics Express*, 2017, Vol 25, Issue 6, pp. 6253–6262. DOI: 10.1364/OE.25.006253
15. Lipovko P. O. Loganchuk M. L. Component Analysis of Binary Media by Acoustic Reflectance Impedance Measurement. *Computernie issledovaniya i modelirovanie*, 2015, Vol. 2, i. 7, p.p. 301–313.
16. Shastin V. I. Kargapol'tcev S. K. Gozbenko V. E. Livshits A. V. and Filippenko N. G. Results of the Complex Studies of Microstructural, Physical and Mechanical Properties of Engineering Materials Using Innovative Methods, *Inter-national Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, 2017, pp. 15269–15272
17. Gigimontov I. N. Stepanov S. V. Svalov A. V. Application of stochastic pore-network modeling to obtain an improved porosity – absolute permeability relationship on the example of Neocomian deposits of the Western Siberia field. *Neftyanoe hozyaistvo*, 2017, pp. 96–98
18. Bilal Saad, Ardi Negara, Syed Shujath Ali, Digital Rock Physics Combined with Machine Learning for Rock Mechanical Properties Characterization. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, 2018, doi:10.2118/193269-MS
19. Duchkov A. D. Dugarov G.A, Duchkov A. A. Drobchik A. N. Laboratory studies of the speed and absorption of ultrasonic waves in sand samples containing water / ice, methane and tetrahydrofuran hydrates. *Geologiya i geofizika*, 2019, Vol. 2, doi:10.15372/GiG2019015 [In Russ]
20. Mottershead J. E. Friswell M. I. Model updating in structural dynamics: a survey. *J. Sound Vib.* 1993, Vol. 167, pp. 347–375
21. Friswell M. I. Mottershead J. E. Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands, 1995, 286 p.
22. Zou Y. Tong L. Steven G. P. Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures-a review. *J. Sound Vib.* 2000, Vol. 230, pp. 357–378
23. Sinha J. K. Friswell M. I. Edqards S. Simplified models for the location of cracks in beam structures using measured vibration data. *J. Sound Vib.* 2002, Vol. 251, pp. 13–38

24. Liu G. R. Han X. Computational Inverse Techniques in nondestructive Evaluation. *CRC Press*, Boca Raton, FL. 2003. 592 p.
25. Taheri H. Koester L. W. Bigelow T. A. Bond L. J. Thermoelastic finite element modeling of laser generated ultrasound in additive manufacturing materials. *ASNT Annual Conference 2017*, 2017, pp. 188–198.
26. Favorskaya A. V. Investigation of plate material properties by laser ultrasound using multiple wave analysis. *Computernie issledovaniya i modelirovanie*, 2019, Vol. 11, i. 4, pp. 653–673.
27. Sun H. Waisman H. Betti R. A sweeping window method for detection of flaws using an explicit dynamic XFEM and absorbing boundary layers. *Internat. J. Numer. Methods Engrg.* 2016, Vol. 105, pp. 1014–1040.
28. Gravenkamp H. Natarajan S. Dornisch W. On the use of NURBS-based discretizations in the scaled boundary finite element method for wave propagation problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2017, Vol. 315, pp. 867–880.
29. Jung J. Jeong C. Taciroglu E. Identification of a scatterer embedded in elastic heterogeneous media using dynamic XFEM. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2013, Vol. 259, pp. 50–63.
30. Bychkov A. Simonova V. Zarubin V. Cherepetskaya E. Karabutov A. The progress in photoacoustic and laser ultrasonic tomographic imaging for biomedicine and industry: A review, Vol. 8, (10), 15, 2018, DOI: 10.3390/app8101931.
31. Potravkin N. N. Cherepetskaya E. B. Perezhogin I. A. Makarov V. A. Ultrashort elliptically polarized laser pulse interaction with helical photonic metamaterial. *Optical Materials Express*, Vol. 4, (10), 2014, p.p. 2090–2101, DOI: 10.1364/OME.4.002090.
32. Kim J. E. Kim D. S. Ma P. S. Kim Y. Y. Multi-physics interpolation for the topology optimization of piezoelectric systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2010, Vol. 199, pp. 3153–3168
33. Zhai J. Zhao G. Shang L. Integrated design optimization of structural size and control system of piezoelectric curved shells with respect to sound radiation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, Vol. 6.
34. Zhai S. Chen H. Ding C. Shen F. Luo C. Zhao X. Manipulation of transmitted wave front using ultrathin planar acoustic metasurfaces. *Applied Physics A*, 2015, Vol. 120(4), pp. 1283–1289.
35. Gil Ho Y. Hyunggyu C. Shin H. Multiphysics topology optimization for piezoelectric acoustic focuser. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, Vol. 332, pp. 600–623.
36. Pashkin A. I. Vinnikov V. A. Modeling propagation of laser–ultrasonic probing pulse in stratified medium by the method of ABCD matrices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, Vol. 6, p.p. 140–150, DOI: 10.25018/0236–1493–2020–6-0–140–150. [In Russ]
37. Pashkin A. I. Patent RU 2020610531, 15.01.2020. [In Russ]

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пашкин Александр Игоревич – аспирант, alexandrill@ya.ru, Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС» Горный институт, Москва, Россия.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pashkin A. I., PhD-student, alexandrill@ya.ru, National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.01.2021; получена после рецензии 24.02.2021; принята к печати 10.03.2021.  
Received by the editors 20.01.2021; received after the review 24.02.2021; accepted for printing 10.03.2021.